

Leider hat sich bei der Berechnung der gedrehten Benchmarkfunktionen ein Fehler eingeschlichen, der im Detail zu anderen Ergebnissen führt. Die grundlegenden Aussagen zu den gedrehten Benchmarkfunktionen können aber unverändert aufrecht erhalten werden.

Hier sind die korrigierten Seiten zu Kapitel 5 und eine korrigierte Version der Ergebniszusammenfassung (Kapitel 7) zu finden.

bei den ungedrehten Funktionen gerechnet werden. An Hand der beiden Funktionen, bei denen die Drehung den größten Effekt bewirkte, soll abschließend geprüft werden, ob die im vorigen Abschnitt gefundenen Ergebnisse mit der rotierten Funktion bestätigt werden können. Dazu wurde die verzögerte und unverzögerte direkte Integration mit allen Parametrierungen wie bisher mit einer Ausnahme untersucht: Bei der verzögerten direkten Integration wurde auf die Nischenparametrierung P2 verzichtet, da P1 und P3 ausreichen, um beurteilen zu können, ob strengere oder weniger strenge Nischenkriterien eine Rolle spielen.

5.2.3.1 Gedrehte Version von Shekel's Foxholes

Abb. 5.148 vergleicht die Ergebnisse der besten Parametrierungen beider direkt integrierter lokaler Verfahren. Der Vergleich beruht auf allen Jobs mit lokaler Verbesserung des besten (*best*) oder aller Nachkommen (*all*) sowie der niedrigen und der mittleren Präzision. Daraus wurden die Jobs ausgewählt, deren Lamarckraten die besten Ergebnisse gebracht haben. Auf die Darstellung der Ergebnisse mit hoher Präzision konnte verzichtet werden, da die besten Jobs mit 368851 Evaluationen (*GR, p30,h,best,15*) für *best* und 370702 Evaluationen (*GR, p10,h,all,10*) für *all* deutlich über den guten Werten von Abb. 5.148 liegen, siehe Anhang B.2.6. Da alle Jobs bis auf *GR,n,best,10* unter 20 Tausend Evaluationen kommen, wird in Abb. 5.149 ein Ausschnitt von Abb. 5.148 gezeigt, der die Unterschiede der guten Jobs klarer hervortreten läßt. Nun ist deutlich zu erkennen, daß die direkte Complex-Integration am besten abschneidet, wobei der Unterschied zwischen dem Job *GC,p20,best,10* und dem Job *GC,p5,all,15* kaum ins Gewicht fällt. Bei der direkten Rosenbrock-Integration setzt sich der Trend zum besseren Abschneiden verstärkter Breiten-

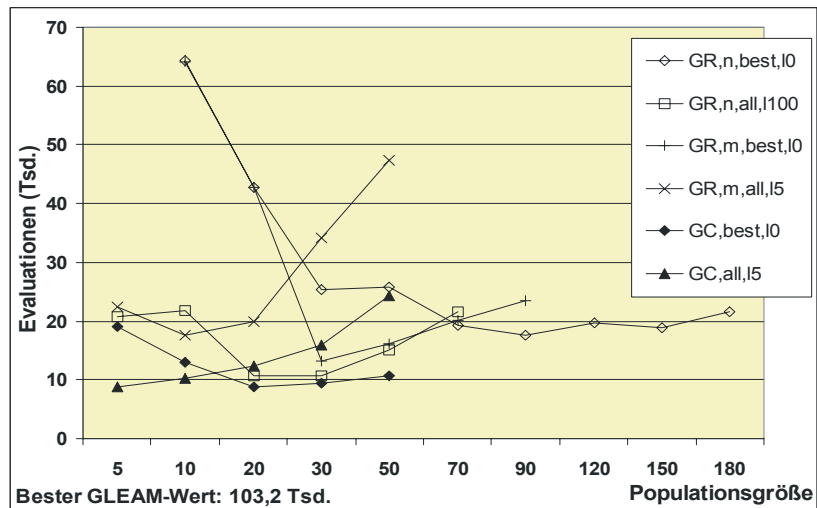


Abb. 5.148: Direkte Rosenbrock- und Complex-Integration: Vergleich der besten Jobs für die lokale Verbesserung aller oder nur des besten Nachkommen sowie niedrige und mittlere Präzision. Dargestellt sind die Jobs, deren Lamarckrate die besten Resultate lieferte. (Foxholes, rotiert)

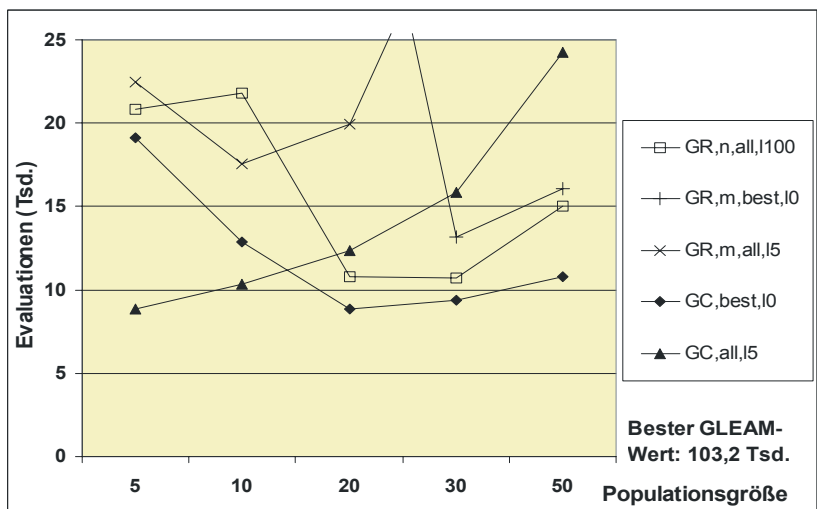


Abb. 5.149: Detailansicht aus Abb. 5.148. Dargestellt sind die Jobs aller Parametrierungen bis auf *GR,n,best,10* mit bis zu 25000 Evaluationen. (Foxholes, rotiert)

Bei der direkten Rosenbrock-Integration setzt sich der Trend zum besseren Abschneiden verstärkter Breiten-

suche durch die lokale Verbesserung aller Nachkommen fort: Das Ergebnis von $GR,p30,n,all,1100$ ist nur etwas schlechter als die Resultate der Complex-Integration. Die Resultate weichen mit dem guten Abschneiden der reinen Baldwin-Evolution bzw. einer Lamarckrate von 5%, und dem Trend zu etwas größeren Populationen von den Ergebnissen der bisherigen Untersuchungen ab. Damit setzt sich der bei der Originalversion von Shekel's Foxholes beobachtete Trend fort, daß andere Lamarckraten als 100% oder die lokale Verbesserung aller Nachkommen ebenfalls gute Ergebnisse liefern.

Die verzögerte direkte Integration bringt hier keine Vorteile, wie aus Abb. 5.150 entnommen werden kann. Es vergleicht die beiden Complex-Jobs mit dem besten unverzögerten Complex-Job. Die direkte Rosenbrock-Integration liegt mit günstigstenfalls 55389 Evaluationen ($GR,p1000,n,P3$) deutlich schlechter.

Zusammenfassend vergleicht Abb. 5.151 die besten Jobs je untersuchter Integrationsart und Parametrierung. Im Falle der rotierten

Foxhole-Funktion schneidet die direkte Complex-Integration bei Baldwin-Evolution und Verbesserungen des besten Nachkommen am besten ab. Sie übertrifft GLEAM hinsichtlich der benötigten Evaluationen um den Faktor 11.7 und liegt damit im Bereich der bisher durch die Hybridisierungen erreichten Verbesserungen.

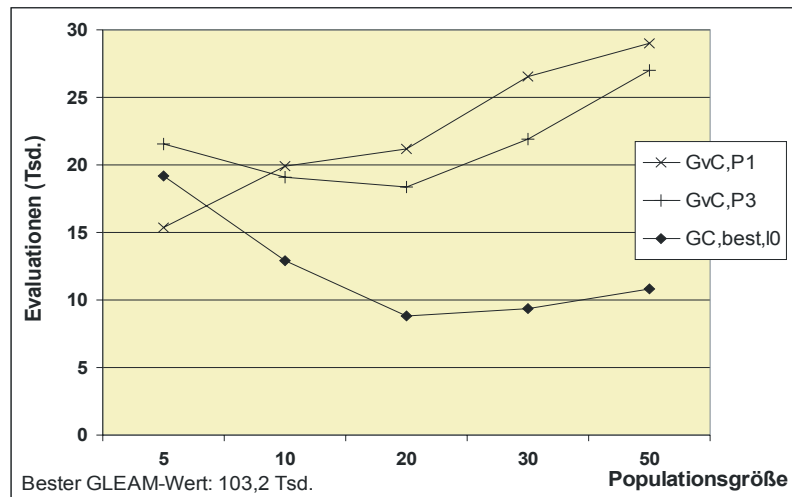


Abb. 5.150: Verzögerte direkte Integration: Vergleich der besten Rosenbrock-Präzision mit den Complex-Jobs. (Foxholes, rotiert)

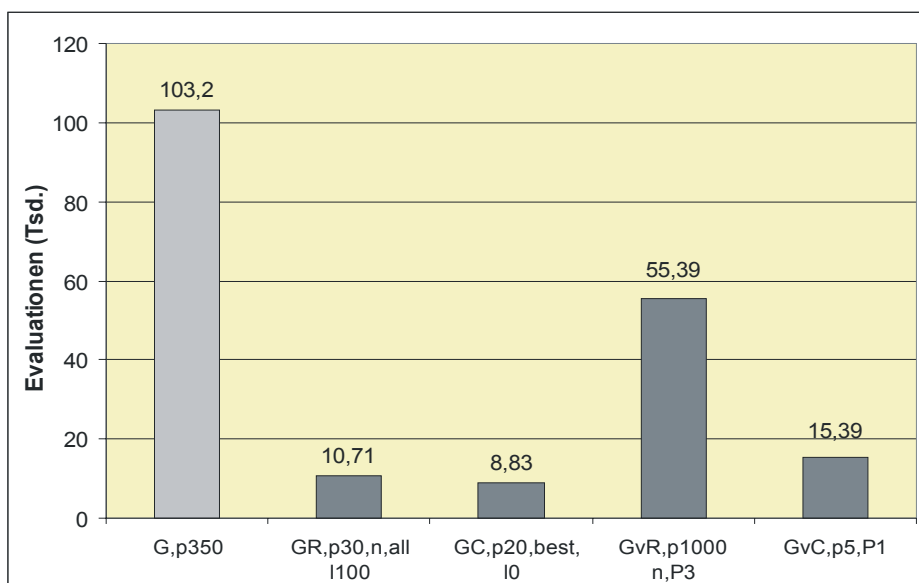


Abb. 5.151: Gesamtvergleich der besten Jobs je Hybridisierungsart und Parametrierung mit 100% Erfolgsrate im Vergleich mit dem besten GLEAM-Job. (Foxholes, rotiert)

5.2.3.2 Gedrehte Version der verallgemeinerten Rastrigin Funktion

Abb. 5.145 hat gezeigt, daß GLEAM bei der gedrehten Version der verallgemeinerten Rastrigin Funktion im Bereich bis zu einer Populationsgröße von 500 keinen Erfolg hat. Da die ersten erfolgreichen Jobs erst ab einer Populationsgröße von 6000 auftreten, werden die Untersuchungsergebnisse zur Ermittlung geeigneter Populationsgrößen auf die Bilder 5.152 und 5.153 aufgeteilt. Abb. 5.152 zeigt die Resultate von Populationen zwischen ein- und achttausend Individuen. Der Aufwand steigt mit sinkender Populationsgröße nicht kontinuierlich an, da bei den erfolglosen Läufen meist das Generationslimit, das hier mit 100000 vorgegeben wurde, erreicht wird. In Abb. 5.153 sind die Ergebnisse ab der ersten erfolgreichen Populationsgröße dargestellt. Der günstigste Wert ergibt sich bei 11200 Individuen mit einem durchschnittlichen Aufwand von 3518702 Evaluationen. Der Erfolg der in Abb. 5.153

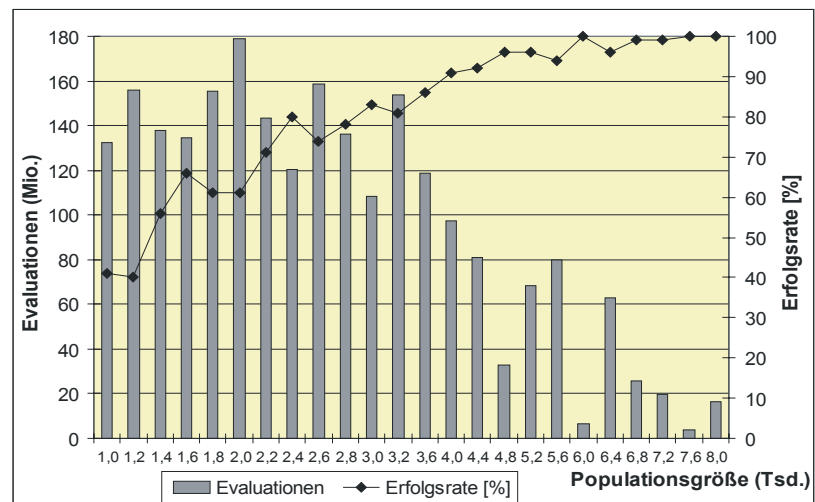


Abb. 5.152: GLEAM: Vergleich der Populationsgrößen zwischen ein- und achttausend. (Rastrigin, 5 Parameter, rotiert)

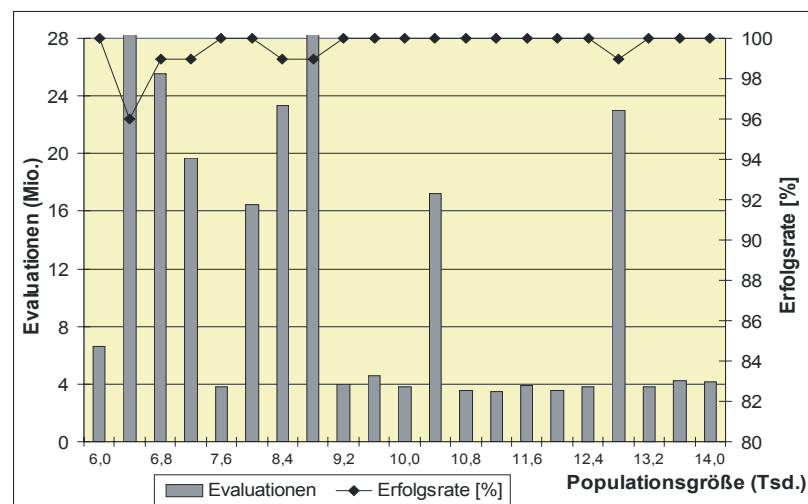


Abb. 5.153: GLEAM: Vergleich der Populationsgrößen zwischen 6000 und 14000. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wurde jede zweite Populationsgröße weggelassen. Die Schrittweite zwischen den Größen beträgt 400. (Rastrigin, 5 Param., rotiert)

dargestellten Jobs ist mit einer geringen Unsicherheit behaftet, da es immer wieder zu erfolglosen (z.B. G_p12800) oder außergewöhnlich aufwendigen Läufen (z.B. G_p10400) kommt. Das unterstreicht zusammen mit den vergleichsweise extrem großen Populationen die Schwierigkeit der gedrehten Variante der Rastrigin Funktion.

Die direkte Integration hat auch im Falle der rotierten Rastrigin Funktion nur mit dem Rosenbrock-Verfahren Erfolg. Abb. 5.154 zeigt die besten und zweitbesten Jobs bei lokaler Verbesserung nur des besten (oben) und aller Nachkommen (unten) für die niedrige und die mittlere Präzision. Wegen der schon recht hohen Laufzeiten bei mittlerer Präzision wurde auf Experimente mit der hohen verzichtet. Außerdem wurde die Anzahl der Iterationen der lokalen Verfahren auf 500 begrenzt. Zunächst fällt auf, daß auch bei der zweiten gedrehten Funktion die

verstärkte Breitensuche durch Verbesserung aller Nachkommen am erfolgreichsten ist. Die besten Ergebnisse liefert dabei die reine Lamarcksche Evolution: bester Job ist $GR,p70,n,1100$ mit 315715 Evaluationen, was einem Verbesserungsfaktor von 11.2 entspricht. Die Populationsgröße des erfolgreichsten Jobs beträgt 70 und des zweit erfolgreichsten 50. Das sind Werte, die deutlich über den bisher festgestellten Größen von 5 - 10 liegen. All dies kann mit dem gesteigerten Schwierigkeitsgrad der gedrehten Benchmarkfunktion erklärt werden, der sich bereits in den extrem großen Populationen von GLEAM gezeigt hat.

Bei der verzögerten direkten Integration wurden auf Grund der vorliegenden Ergebnisse nicht nur die sonst verwendete Kombination $best,1100$ untersucht, sondern auch die anderen Lamarckraten und die Verbesserung aller Nachkommen. Dabei hat es sich gezeigt, daß die Beschränkung auf die Verbesserung nur des besten Nachkommen bei allen untersuchten Lamarckraten zu schlechteren Ergebnissen führt als bei GLEAM. Die besten Ergebnisse konnten bei einer Lamarckrate von 5% und der Verbesserung aller Nachkommen erzielt werden. Abb. 5.155 vergleicht die Ergebnisse für niedrige und mittlere Präzision bei unterschiedlichen Nischenparametrisierungen. Am günstigsten schneiden die Jobs mit niedriger Präzision ab, wobei die Nischenparametrisierung nicht viel ausmacht. Auch hier fallen die vergleichsweise großen Populationen des

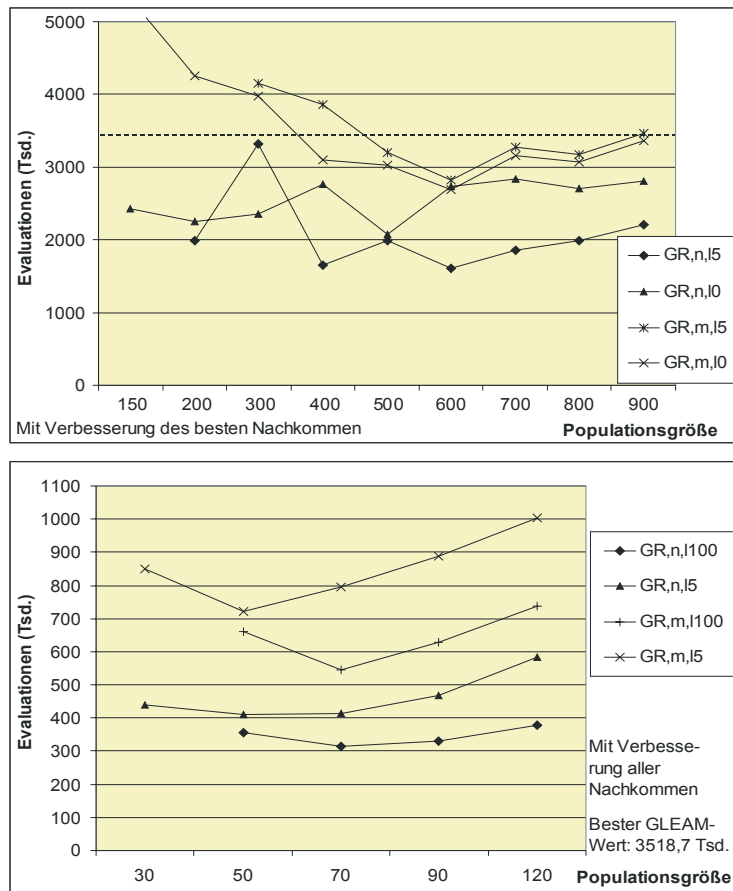


Abb. 5.154: Direkte Rosenbrock-Integration: Vergleich der Jobs mit lokaler Verbesserung nur des besten (oben) oder aller Nachkommen (unten) sowie niedrige und mittlere Präzision. Dargestellt sind alle erfolgreichen Jobs, deren Lamarckrate die besten und zweit-besten Resultate lieferte. Fehlende Jobs ergaben keine Erfolgsrate von 100%. (Rastrigin, 5 Parameter, rotiert)

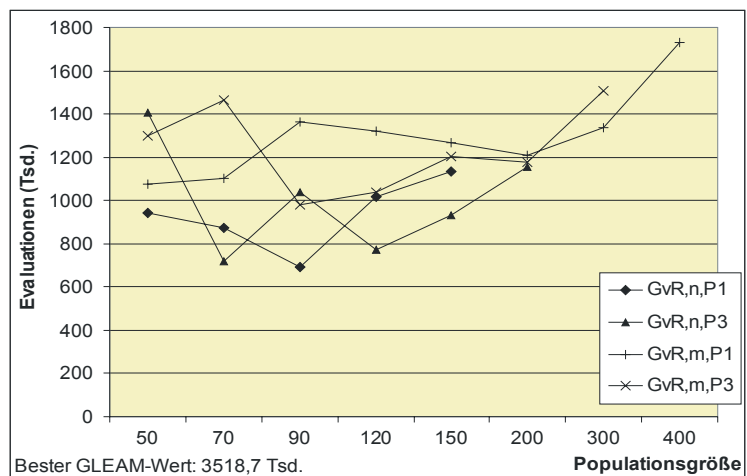


Abb. 5.155: Verzögerte direkte Rosenbrock-Integration: Vergleich der Jobs bei niedriger und mittlerer Präzision, einer Lamarckrate von 5% und Verbesserung aller Nachkommen. (Rastrigin, 5 Parameter, rotiert)

besten Jobs von 90 bzw. 70 beim zweitplatzierten auf. Der Verbesserungsfaktor des besten Jobs beträgt 5.1 und ist damit noch nicht einmal halb so groß wie der beste unverzögerte Job.

Im Gegensatz zu den im vorigen Abschnitt untersuchten Benchmarkfunktionen schneidet die verzögerte direkte Integration bei beiden gedrehten Funktionen deutlich schlechter ab als die unverzögerte. Dies unterstreicht die Aussage von Abschnitt 5.2.2.4, wonach die Frage der vorteilhaften Anwendung der verzögerten direkten Integration nur aufgabenspezifisch beantwortet werden kann.

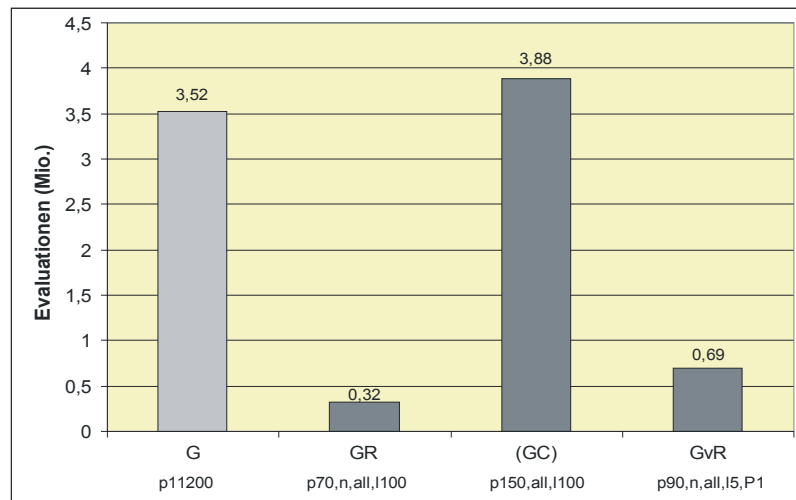


Abb. 5.156: Gesamtvergleich der besten Jobs je Hybridisierungsart und Parametrierung mit 100% Erfolgsrate im Vergleich mit dem besten GLEAM-Job. (Rastrigin, 5 Parameter, rotiert)

Abb. 5.156 faßt die Ergebnisse der (verzögerten) direkten Integration bei der rotierten verallgemeinerten Rastrigin Funktion zusammen. Die Überlegenheit der unverzögerten direkten Rosenbrock-Integration ist deutlich zu erkennen. Da die Werte für die direkte Complex-Integration wegen langer Laufzeiten nur auf zehn statt der sonst üblichen hundert Läufen beruhen, ist der Job hier nur zur Orientierung angegeben und im Bild eingeklammert.

5.2.3.3 Auswertung der Ergebnisse der gedrehten Benchmarkfunktionen

Durch die Drehung der Benchmarkfunktionen Shekel's Foxholes und der 5-dimensionalen verallgemeinerten Rastrigin Funktion konnte gezeigt werden, daß die beiden Funktionen damit für GLEAM deutlich schwerer werden und der so entstandene Raum für Verbesserungen durch die (verzögerte) direkte Integration auch im bisher üblichen Rahmen ausgefüllt wird. Dabei schneidet die verzögerte Variante der direkten Integration bei beiden LSV und beiden Testfällen regelmäßig schlechter ab als die unverzögerte.

Tabelle 5.21 vergleicht die Parametrierungen der beiden erfolgreichsten Jobs für die direkte Integration mit beiden LSV für die gedrehten und ungedrehten Funktionen. Da die direkte Complex-Integration bei beiden Varianten der Rastrigin Funktion wegen extrem langer Laufzeiten nicht weiter untersucht werden konnte, fehlen die entsprechenden Einträge in der Tabelle. Wie bei den bisher behandelten Benchmarkaufgaben zeigt sich auch hier ein uneinheitliches Bild der Parametrierungen. Eines fällt jedoch auf und unterscheidet die Ergebnisse: Bei beiden gedrehten Benchmarkfunktionen spielt die lokale Optimierung aller Nachkommen einer Paarung (*all*) eine größere Rolle als bisher. Da dies bei der gedrehten Rastrigin Funktion durchgängig zu beobachten ist, kann vermutet werden, daß bei schwierigen Problemen mit stark multimodaler Fitnessfunktion eine Verstärkung der Breitensuche durch die lokale Verbesserung von mehr als nur dem besten Nachkommen günstig sein kann. Um diese Vermutung zu erhärten sind weitere, über den Umfang der vorliegenden Arbeit hinausgehende Untersuchungen notwendig.

Aufgabe	LSV	Ver- besserung	Populations- größe	Präzision	maximale Präzision	best / all	Lamarck- rate
Foxholes-1	R	0.54	20	n	h	best	100
Foxholes-2	R	0.52	5	n	h	all	100
Foxholes-rot.-1	R	9.64	30	n	h	all	100
Foxholes-rot.-2	R	7.86	30	m	h	best	0
Rastrigin-1	R	1.18	5	m	m	best	100
Rastrigin-2	R	0.54	20	n	m	best	100
5dim-Rastrigin-rot-1	R	11.15	70	n	m	all	100
5dim-Rastrigin-rot-2	R	8.54	50	n	m	all	5
Foxholes-1	C	0.22	5			all	100
Foxholes-2	C	0.20	20			best	100
Foxholes-rot.-1	C	11.69	20			best	0
Foxholes-rot.-2	C	11.65	5			all	5

Tab. 5.21: Direkte Rosenbrock- und Complex-Integration: Vergleich der Parametrierungen der beiden Jobs mit den größten Verbesserungen hinsichtlich des Aufwands im Vergleich zum jeweils besten GLEAM-Job für die beiden rotierten und unrotierten Benchmarkfunktionen.

5.3 Ergebniszusammenfassung

Dieser Abschnitt faßt die im Abschnitt 5.2 detailliert ausgewerteten Ergebnisse der einzelnen Benchmarkaufgaben und der gedrehten Varianten zweier mathematischer Testfunktionen zusammen, indem zunächst die Bilder zum Gesamtvergleich jeder Benchmarkaufgabe angegeben werden. Die Bilder enthalten den besten GLEAM-Job als Vergleich und die jeweils besten Ergebnisse aller Hybridisierungsarten, die mindestens einen *erfolgreichen Job*, worunter ein Job mit einer Erfolgsrate von 100% verstanden wird, aufzuweisen haben. Der besseren Übersicht halber sind die Parametrierungen der Jobs in den Bildern unterhalb der Bezeichnungen für die Hybridisierungsarten angegeben. Danach erfolgt eine Betrachtung des Konvergenzverhaltens gefolgt von einem Vergleich der Untersuchungsergebnisse. Eine Empfehlung zur praktischen Umsetzung beendet den Abschnitt.

Die Details der Untersuchungen können für die einzelnen Benchmarkaufgaben den Abschnitten 5.2.1.1 bis 5.2.1.8 entnommen werden. Hinsichtlich der Analyse der Ergebnisse je Hybridisierungsart wird auf die Abschnitte 5.2.2.1 bis 5.2.2.4 verwiesen.

Abb. 5.157 zeigt die Ergebnisse von *Schwefel's Sphere*. Hier gibt es gleich zwei Ausnahmen vom zuvor angekündigten Bildinhalt: Erstens ist GLEAM bei dieser Aufgabe nicht erfolgreich und somit steht kein GLEAM-Job als Vergleichswert zur Verfügung. Stattdessen wird hier der erfolgreichste Rosenbrock-Job angegeben, der allerdings nur bei der höchsten (und unüblichen) Präzision ν Erfolg hat. Zweitens enthält das Bild einen Nachoptimierungsjob, obwohl er streng genommen die Erfolgsmarge nicht erreicht hat. Er ist hier trotzdem enthalten, da er sehr gute Ergebnisse geliefert hat: Die schlechteste Fitness von 100 Läufen war nur

Wie in Abschnitt 5.2.3 dargelegt, wurde daher die Aufgabe durch Drehung um einen geeigneten Winkel (hier 30°) erschwert. Die rotierte Version wurde mit der verzögerten und der unverzögerten direkten Integration beider lokaler Verfahren getestet, da sich diese beiden als die erfolgreichsten Hybridisierungsarten erwiesen haben. Abb. 5.159 zeigt die Ergebnisse. Mit der gedrehten Funktion konnte eine Verringerung des Aufwands gegenüber GLEAM um den Faktor 11.7 bei der direkten Complex-Integration erreicht werden. Da auch die direkte Rosenbrock-Integration mit einem Faktor von 9.6 eine beachtliche Verbesserung erzielt, reiht sich der Fall der gedrehten Foxhole Funktion in die Reihe der Erfolge der direkten Integration ein.

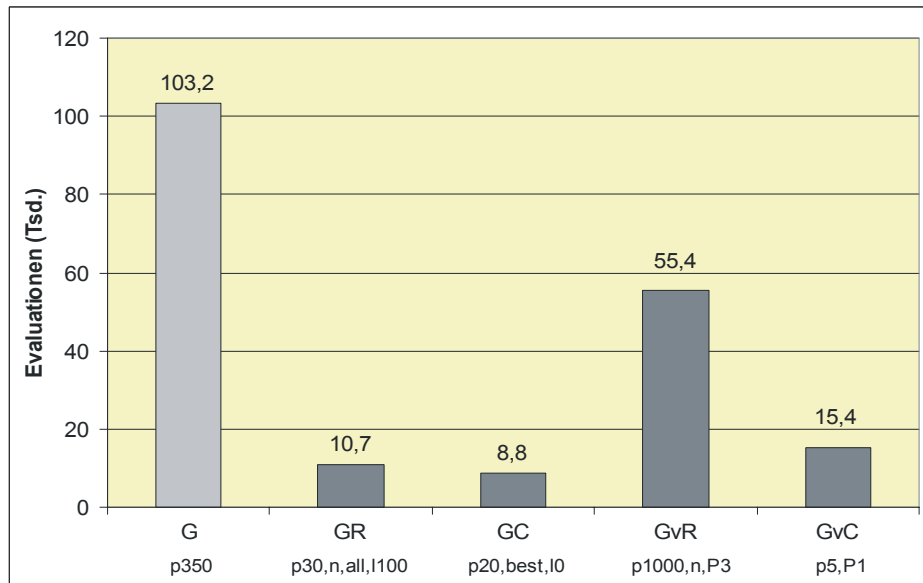


Abb. 5.159: Shekel's Foxholes, um 30° gedreht: Gesamtvergleich der besten Jobs je erfolgreicher (verzögerter) direkter Integration.

Für die verallgemeinerte Rastrigin Funktion gilt hinsichtlich der Lösungsfähigkeit durch GLEAM und dem damit verbundenen Schwierigkeitsgrad für den EA ähnliches wie für Shekel's Foxholes. Auch hier wird die Aufgabe mit einer Population von nur fünf Individuen gelöst und lediglich die (verzögerte) direkte Rosenbrock-Integration kann gegenüber GLEAM

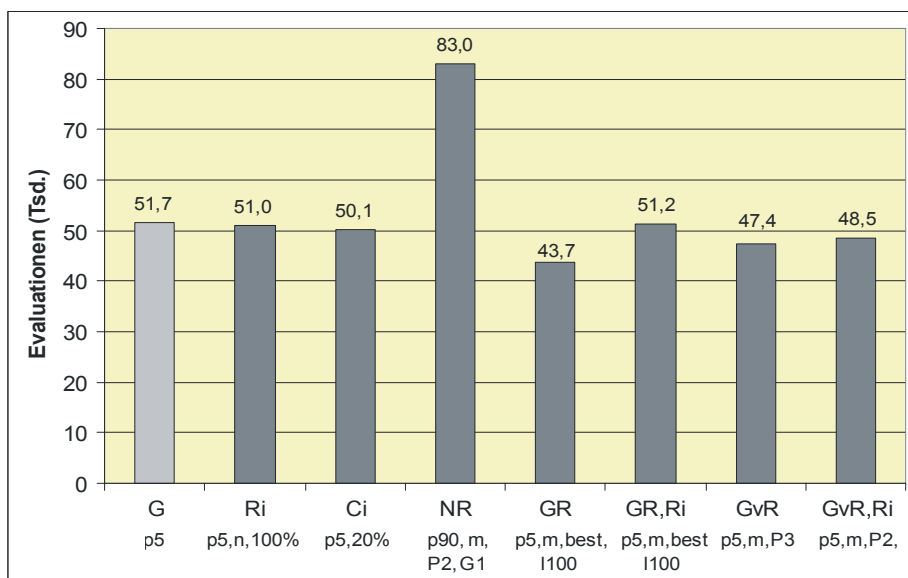


Abb. 5.160: 20-dimensionale verallgemeinerte Rastrigin Funktion: Gesamtvergleich der besten Jobs je erfolgreicher Integrationsart.

mit einem kleinen Vorteil aufwarten, wie Abb. 5.160 zeigt. Bemerkenswert ist auch, daß die sonst erfolglose Nachoptimierung hier mit dem Rosenbrock-Verfahren einen Erfolg aufzuweisen hat.

Wie bei Shekel's Foxholes wurde eine um 30° gedrehte Version der Rastrigin Funktion getestet. Dabei stellte es sich heraus, daß GLEAM die ursprünglich 20-dimensionale Variante der Funktion nicht lösen konnte, weswegen die weiteren Untersuchungen auf den 5-dimensionalen Fall beschränkt wurden, siehe auch Abschnitt 5.2.3. Die rotierte 5-dimensionale Version wurde ebenfalls mit der verzögerten und der unverzögerten direkten Integration beider lokaler Verfahren getestet. Dabei konnte die direkte Rosenbrock-Integration mit einem Verbesserungsfaktor von 11.2 am besten abschneiden und die verzögerten Variante übertrumpfen, siehe Abb. 5.161. Die direkte Complex-Integration ist wie bei der unrotierten Version der Testfunktion nicht erfolgreich.

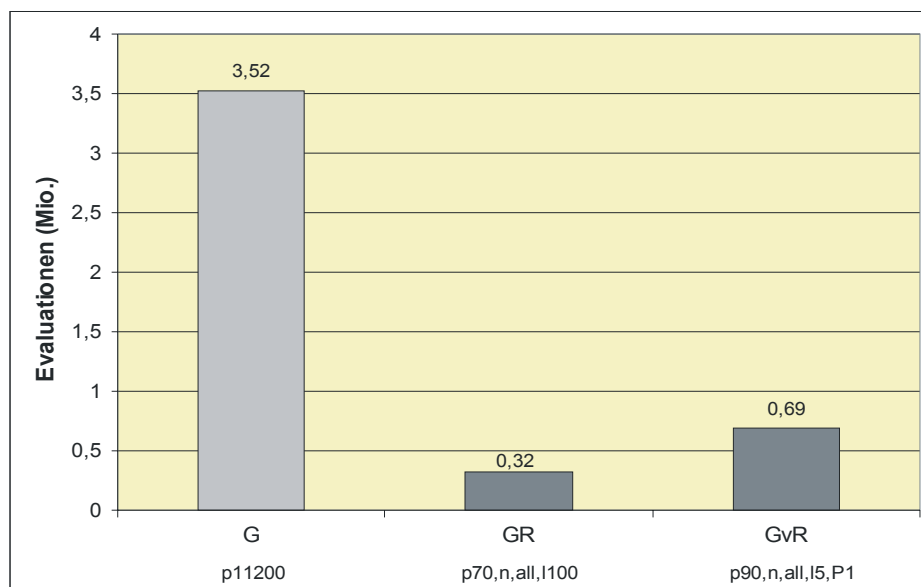


Abb. 5.161: 5-dimensionale verallgemeinerte Rastrigin Funktion, um 30° gedreht: Gesamtvergleich der besten Jobs je erfolgreicher (verzögerter) direkter Integration.

Bei Fletcher's Function benötigt GLEAM eine Population von 600 Individuen, um das Problem zuverlässig mit über 480 Tausend Evaluationen zu lösen. Die Voroptimierung und vor allem die (verzögerte) direkte Integration beider LSV nutzen diesen Raum für erhebliche Verbesserungen, wie Abb. 5.162 im Überblick zeigt. Um die Unterschiede zwischen den verschiedenen Hybridisierungsarten deutlicher hervortreten zu lassen, werden sie ohne GLEAM in

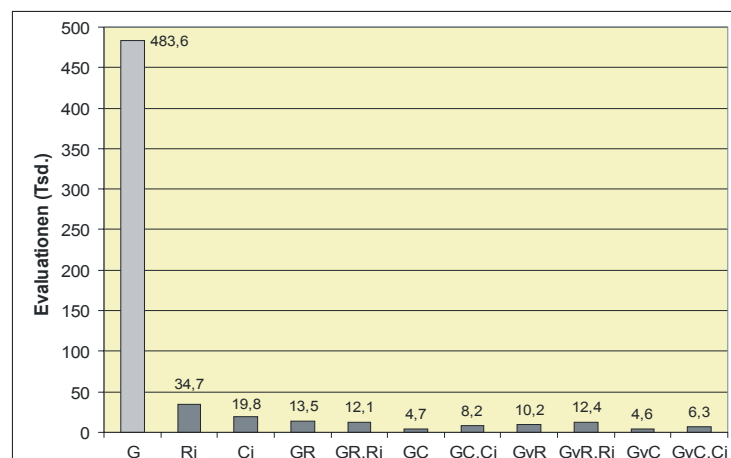


Abb. 5.162: Fletcher's Function: Gesamtvergleich der besten Jobs je erfolgreicher Integrationsart.

5.3.1 Konvergenzverhalten

Da es bekanntlich bisher nicht gelang, streng mathematische Beweise für die Konvergenz Evolutionärer Algorithmen bei nichtlinearen Aufgabenstellungen zu finden, bleibt die Frage der Konvergenzsicherheit ein offenes Problem. Trotzdem können auf Grund der vorliegenden Untersuchungen empirisch begründete Aussagen über das Konvergenzverhalten gemacht werden.

Wie in Abschnitt 5.2.1 dargelegt, zeigt GLEAM bei neun der zehn Testaufgaben² ab einer hinreichenden Populationsgröße ein sicheres Konvergenzverhalten. Die Ausnahme ist die mathematische Benchmarkaufgabe Schwefel's Sphere, bei der die Läufe wegen extrem langer Laufzeiten abgebrochen wurden. Die gelieferten Resultate waren sehr nahe am geforderten Zielwert, so daß von einer extrem langsamen Annäherung an das Optimum ausgegangen werden kann. Das Beispiel bestätigt die oft beobachtete langsame Konvergenz Evolutionärer Algorithmen in der Nähe des Optimums.

Interessant ist nun die Frage, ob und wie sich das Konvergenzverhalten bei den jeweils erfolgreichsten Hybridisierungsarten verbessert hat. Tabelle 5.22 faßt die Ergebnisse zusammen, wobei alle Angaben auf 100 Läufen basieren und die Verbesserungen gegenüber GLEAM als Quotient der vom besten GLEAM-Job benötigten Evaluationen durch die Evaluationen des zu vergleichenden Jobs berechnet sind.

Testaufgabe	Hybridisierungsart	Erfolgsrate [%]	Verbesserung gegenüber GLEAM
Schwefel's Sphere	verzögerte direkte Rosenbrock-Integration	100	28400 Evaluationen statt 26 Millionen und mehr
Shekel's Foxholes	Rosenbrock-Voroptimierung	100	1.60
Shekel's Foxholes (rotiert)	direkte Complex-Integration	100	11.69
Rastrigin Funktion	direkte Rosenbrock-Integration	100	1.18
Rastrigin Funktion (rotiert)	direkte Rosenbrock-Integration	100	11.15
Fletcher's Function	verzögerte direkte Complex-Integration	100	104.22
Fraktale Funktion	direkte Rosenbrock-Integration mit Rosenbrock-Voroptimierung	100	6.50
Designoptimierung	verzögerte direkte Complex-Integration	100	5.80
Ressourcenplanung	verzögerte direkte Rosenbrock-Integration	100	89.27
Roboterbahnplanung	Complex-Voroptimierung	100	1.03

Tab. 5.22: Verbesserung der Konvergenzgeschwindigkeit durch Hybridisierung.

Das wichtigste Ergebnis ist, daß bei allen Testaufgaben das Optimierungsziel mit einer Erfolgsquote von 100% gefunden wurde. Bei Schwefel's Sphere konnte die Aufgabe nur durch die hybride Form von GLEAM gelöst werden, wenn von dem Rosenbrock-Job mit extremer

2. Die beiden rotierten Benchmarkfunktionen können in diesem Zusammenhang als eigenständige Testfälle betrachtet werden.

der beiden Funktionen im Raum werden sie jedoch, wie in Abschnitt 5.2.3 beschrieben, auch für GLEAM „schwierig“. Abb. 5.171 vergleicht die Ergebnisse der rotierten Funktionen und der anderen Benchmarkaufgaben von Abb. 5.170 für die verzögerte und unverzögerte direkte Integration beider LSV. Die erreichten Verbesserungen der beiden gedrehten Funktionen fügen sich in das Bild der vier anderen Benchmarkaufgaben ein. Der wesentliche Unterschied besteht darin, daß bei den rotierten Funktionen die verzögerten Varianten schlechtere Resultate liefern und daß die Verbesserung aller Nachkommen statt nur des besten und damit eine verstärkte Breitensuche meist die besseren Ergebnisse liefert. Dies bestätigt die Aussage der Abschnitte 5.2.2.3, und 5.2.2.4 wonach die Frage, welche Parametrierung und ob und welche Verzögerung der direkten Integration vorteilhaft ist, nur aufgabenspezifisch beantwortet werden kann.

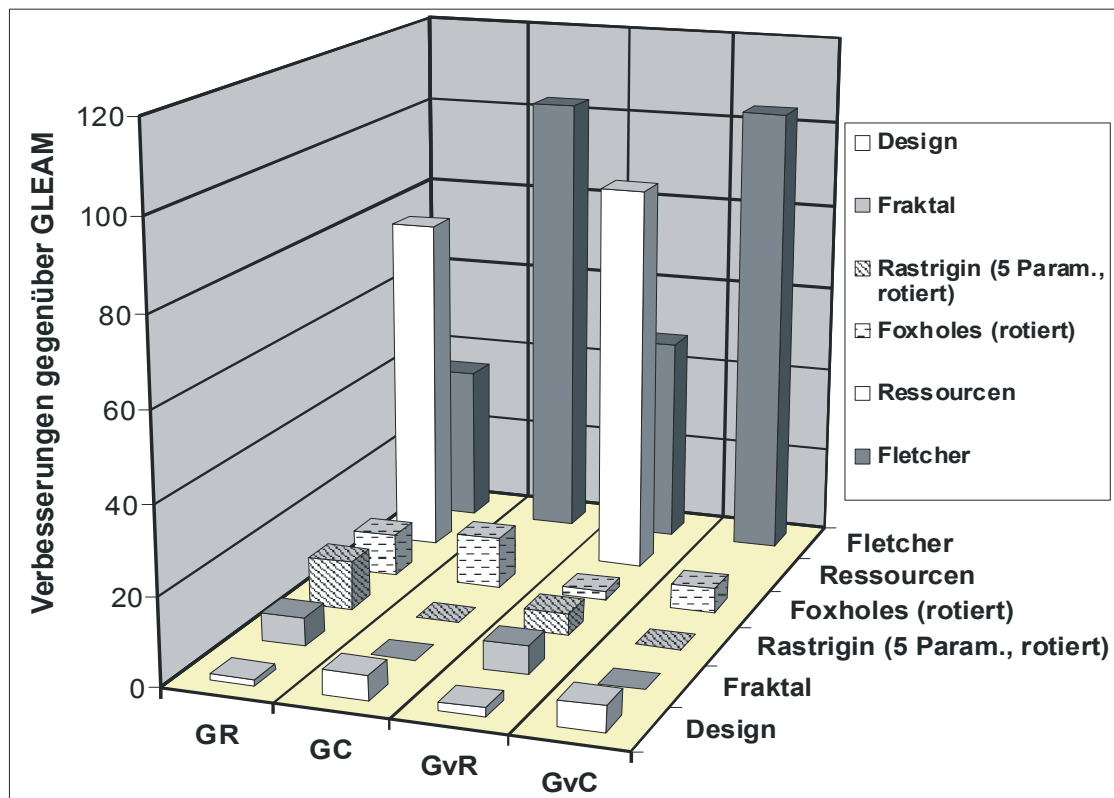


Abb. 5.171: Vergleich der (verzögerten) direkten Integration beider LSV für die rotierten Benchmarkfunktionen und die restlichen Benchmarkaufgaben von Abb. 5.170.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die (verzögerte) direkte Integration sowohl die Konvergenzsicherheit als auch die Konvergenzgeschwindigkeit erhöht. Das Ausmaß der Leistungssteigerung ist anwendungsabhängig und kann im Einzelfall erheblich sein.

5.3.3 Anwendungsempfehlung

Zur Bestimmung des praktischen Nutzwertes der vorliegenden Untersuchung sind zwei Fälle zu unterscheiden: Die Einzeloptimierung unterschiedlicher Aufgabenstellungen und die immer wiederkehrende Optimierung von Varianten einer Aufgabe. Nur im letzteren Fall lohnt eine genauere Bestimmung der günstigsten Hybridisierungsart und ihrer Parametrierung, sofern der zeitliche Aufwand dazu vertretbar ist.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Bei der praktischen Anwendung Evolutionärer Algorithmen wird das Problem, daß sie in der Nähe des Optimums meist langsam konvergieren, häufig durch eine Hybridisierung mit lokalen und schnelleren Verfahren gelöst. Da die dabei verwendeten lokalen Suchverfahren in der Regel aufgabenspezifischer Natur sind, wird aus dem allgemein anwendbaren EA ein anwendungsspezifisches Werkzeug. Den vielen, meist problemspezifischen Untersuchungen zur zweckmäßigen Verfahrenskombination auf der Ebene geeigneter Parametrierungen und anderer Details der konkreten Hybridisierung steht ein Mangel an Analysen auf globaler Ebene gegenüber: Wie werden lokale und globale Suchverfahren passend kombiniert und die zur Verfügung stehende Rechenzeit so aufgeteilt, daß das hybride Verfahren zuverlässiger und schneller eine Lösung findet als die beteiligten Algorithmen allein? [Gol99]. Auch ist die Frage angesichts sich widersprechender Untersuchungsergebnisse ungeklärt, ob und wenn ja mit welcher Häufigkeit eine genotypische Anpassung an die Lösung des lokalen Suchverfahrens erfolgen soll.

Zur Lösung dieser offenen Probleme bei der Anwendung Evolutionärer Algorithmen liefert die vorliegende Arbeit einen Beitrag durch die Bearbeitung folgender Teilaufgaben:

1. Eine neue Methodik zur Kombination von lokalen Suchverfahren mit Evolutionären Algorithmen unter Wahrung der allgemeinen Anwendbarkeit des resultierenden hybriden Verfahrens wurde erarbeitet.
2. Für die beispielhafte praktische Erprobung der neuen Methodik wurden als allgemein anwendbare lokale Verfahren der Rosenbrock-Algorithmus und das Complex-Verfahren ausgewählt. GLEAM wurde als repräsentativer Vertreter der Evolutionären Algorithmen für die Untersuchungen benutzt, da das Verfahren Elemente der ES und der GA in sich vereint und somit die bestmöglichen Voraussetzungen für die Übertragbarkeit der gefundenen Resultate auf andere Evolutionäre Algorithmen bietet.
3. Ein neues Steuerungsverfahren zur Aufteilung der Rechenzeit zwischen Evolutionärem Algorithmus und lokalem Suchverfahren wurde entwickelt. Dabei wurde Wert darauf gelegt, daß die neue Steuerung basierend auf der Bildung von Nischen einander ähnlicher Individuen innerhalb einer Population auch bei anderen EA als dem ausgewählten anwendbar ist.
4. Für empirische Untersuchungen der neuen Methode wurden repräsentative Benchmarkaufgaben ausgewählt, die schnell genug sind, um statistische Untersuchungen zu ermöglichen. Sie decken die Bereiche der reinen Parameteroptimierung, der kombinatorischen und der gemischt-ganzzahligen Optimierung sowie der Behandlung dynamischer Parametersätze ab.
5. Es wurde ein Konzept zur Integration der vorgeschlagenen lokalen Suchverfahren entsprechend der neuen Methode in das vorhandene Softwaresystem von GLEAM entwickelt und implementiert.
6. Zur Überprüfung der Ziele einer beschleunigten Konvergenz unter Beibehaltung der Konvergenzsicherheit wurden umfangreiche experimentelle Untersuchungen an den zuvor ausgewählten Benchmarkaufgaben durchgeführt und ausgewertet.

Untersucht wurden folgende Hybridisierungsarten und Kombinationen:

1. Vorooptimierung
Vorooptimierung eines Teils oder der gesamten Startpopulation mit dem Rosenbrock-Verfahren oder dem Complex-Algorithmus.
2. Nachoptimierung
Nachoptimierung der GLEAM-Ergebnisse mit dem Rosenbrock-Verfahren oder dem Complex-Algorithmus, wobei bei letzterem entweder jedes GLEAM-Ergebnis als ein Startpunkt in einem separaten Complex-Lauf bearbeitet wird oder alle Ergebnisse zur Bildung eines Startcomplexes für einen Nachoptimierungs-Lauf herangezogen werden.
3. Direkte Integration mit und ohne Vorooptimierung
Lokale Verbesserung aller oder nur des besten Nachkommens einer Paarung mit unterschiedlichen Lamarckraten unter Verwendung des Rosenbrock- oder des Complex-Verfahrens. Eine weitere Variation ist die Vorooptimierung der Startpopulation durch das jeweilige lokale Verfahren.
4. Verzögerte direkte Integration mit und ohne Vorooptimierung
Verzögerte lokale Verbesserung aller oder nur des besten Nachkommens einer Paarung bei meist reiner Lamarckscher Evolution unter Verwendung des Rosenbrock- oder des Complex-Verfahrens. Die Verzögerung wird durch den gleichen Steuerungsmechanismus wie bei der Nachoptimierung kontrolliert. Eine weitere Variation ist die Vorooptimierung der Startpopulation durch das jeweilige lokale Verfahren.

Eine relevante Steigerung der Konvergenzgeschwindigkeit konnte bei fünf der acht Testaufgaben erreicht werden, da sich drei aus unterschiedlichen Gründen als schlecht geeignet für eine Verbesserung durch die Hybridisierung erwiesen haben. Zum einen sind das die mathematischen Benchmarkaufgaben Shekel's Foxholes und die verallgemeinerte Rastrigin Funktion, die in ihrer ursprünglichen Form „einfach genug“ sind, um bereits durch GLEAM so effizient gelöst zu werden, daß eine weitere Verbesserung kaum möglich ist (Verbesserungsfaktoren von 1.6 und 1.18). Das wird unter anderem daran deutlich, daß GLEAM noch bei der extrem kleinen Populationsgröße von fünf sicher konvergiert. Dieses Teilergebnis ist in gewisser Hinsicht überraschend, da beide Aufgaben als schwierig für die Standard-ES gelten. Bei einer Drehung der beiden Funktionen im Raum werden sie jedoch auch für GLEAM „schwierig“. Es konnte gezeigt werden, daß die direkte Integration auch bei den gedrehten Funktionen in der Lage ist, mit Verbesserungsfaktoren gegenüber GLEAM von 11.7 bei der Foxhole- und 11.2 bei der Rastrigin-Funktion ein gutes Ergebnis zu erzielen. Zum anderen handelt es sich dabei um die kollisionsfreie Roboterbahnplanung, bei der sowohl die Parametrierung als auch die Reihenfolge der Befehle für den Erfolg relevant ist. Die geringen Verbesserungen, die die benutzten lokalen Verfahren zur Parameteroptimierung hier erreichen konnten, stehen in keinem Verhältnis zum verursachten Mehraufwand.

Die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit sind:

1. Die Konvergenzsicherheit konnte durch die Hybridisierung nicht nur beibehalten, sondern sogar verbessert werden.
Dies wird bei der Testaufgabe Schwefel's Sphere deutlich, die GLEAM alleine nicht lösen konnte.

2. Die Konvergenzgeschwindigkeit konnte zum Teil erheblich verbessert werden.
Wie in Abb. 5.170 dargestellt, konnte bei fünf der acht Testaufgaben eine Steigerung um den Faktor sechs bis 104 erreicht werden. Werden die beiden „zu einfachen“ Testfunktionen gedreht, so zeigt Abb. 5.171, daß auch hier erhebliche Steigerungsraten möglich sind.
3. Als beste Hybridisierungsart hat sich die direkte Integration in ihrer verzögerten und unverzögerten Variante erwiesen.
Dabei arbeitet die Integration des Rosenbrock-Verfahrens zuverlässiger als die des Complex-Algorithmus, da sie bei allen sechs hier noch betrachteten Testaufgaben und den beiden gedrehten Funktionen erfolgreich anwendbar ist. Wenn dagegen die Complex-Integration funktioniert, liefert sie in drei von fünf Fällen bessere Ergebnisse als das Rosenbrock-Verfahren (siehe Abb. 5.170 und 5.171).
4. Die Lamarcksche Evolution schneidet fast immer am besten ab.
Bis auf die Ausnahmen der direkten Rosenbrock-Integration bei den Testaufgaben *Foxholes* und *Designoptimierung* lieferte die reine Lamarcksche Evolution die besseren Ergebnisse im Vergleich zur gemischten oder reinen Baldwin-Evolution. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu den Empfehlungen von Goldberg und Voessner [Gol99] sowie Orvosh und Davis [Orv93], bestätigt aber die Ergebnisse von Whitley et al. [Whi94].
5. Es gibt keine allgemeingültige „beste Parametrierung“.
Bedauerlicherweise erwies sich die Parametrierung vor allem der verzögerten direkten Integration als aufgabenspezifisch. Immerhin kann die Lamarcksche Evolution bei Verbesserung nur des besten Nachkommens einer Paarung empfohlen werden.
6. Grenzen für eine erfolgreiche Hybridisierung
Von einer Hybridisierung mit lokalen Verfahren zur Parameteroptimierung sollte abgesehen werden, wenn die Aufgabe bereits durch ein lokales oder ein evolutionäres Verfahren effizient gelöst werden kann oder wenn der kombinatorische Anteil an der Lösungsfindung überwiegt.
7. Anwendungsempfehlung
Eine generelle Vorgehensweise zur praktischen Umsetzung der Resultate wurde vorgeschlagen.
8. Adaptive direkte Integration
Die Ergebnisse der empirischen Untersuchungen führten zur Formulierung eines neuen Konzepts für eine adaptive direkte Integration basierend auf Erfolg (Fitnesszugewinn) und Kosten (Evaluationen).

Mit diesen Ergebnissen konnte gezeigt werden, daß die Kombination eines repräsentativen Evolutionären Algorithmus mit allgemein anwendbaren lokalen Suchverfahren wie dem Rosenbrock- und dem Complex-Algorithmus ein hybrides Verfahren ergibt, das die Vorteile beider Algorithmenklassen unter weitgehender Vermeidung der jeweiligen Nachteile in sich vereint. Sowohl die Konvergenzsicherheit als auch die Konvergenzgeschwindigkeit konnten in erheblichem Maße gesteigert werden.

Als ein Nebenergebnis konnte dargelegt werden, daß vermeintlich zu einfache Testfunktionen durch Drehung „schwieriger“ gemacht werden können. Dabei geht es im wesentlichen um die Beseitigung von parallel zu den Koordinatenachsen ausgerichteten Regelmäßigkeiten der Funktionen, die die Suche für EA zu leicht machen.

Die vorliegende Arbeit mußte sich auf die Untersuchung von acht Testaufgaben beschränken, was dem dafür benötigten Gesamtaufwand von über neun CPU-Jahren geschuldet ist. Die hier gefundenen Ergebnisse sollten durch andere Testaufgaben weiter verifiziert werden, wobei solche Aufgaben zu bevorzugen sind, die einen praktischen Hintergrund haben und komplex genug sind, um Raum für Verbesserung durch die Hybridisierung zu lassen. Andererseits müssen sie schnell genug evaluierbar sein, damit statistische Untersuchungen möglich sind. Damit kann auch die Frage der geeigneten Parametrierung der unverzögerten und vor allem der verzögerten direkten Integration weiter verfolgt werden. Auch muß das in Kapitel 6 vorgestellte Konzept zur adaptiven Steuerung der Aufteilung der Rechenkapazitäten zwischen lokaler und globaler Suche und zwischen den lokalen Verfahren bei der direkten Integration erprobt werden.

Bei rein kombinatorischen Aufgaben wurden mit entsprechenden lokalen Algorithmen, wie zum Beispiel dem 2-Opt-Verfahren, beachtliche Erfolge erzielt. Nachdem bei der Roboterbahnplanung die Hybridisierung mit lokaler Parameteroptimierung nicht erfolgreich war, ist die Untersuchung der Frage von Interesse, ob eine kombinatorische lokale Suche eventuell in Verbindung mit Verfahren zur Parameterverbesserung zum Ziel führt.